国际能源科技发展动态研判与战略启示

陈 伟[1,2*] 郭楷模[1] 岳 芳[1]

1 中国科学院武汉文献情报中心 武汉 430071

2 中国科学院大学 经济与管理学院 北京 100190

摘要 当前能源系统正在从化石能源绝对主导向低碳多能融合方向转变。全球能源生产与消费革命正在不断深化，新兴产业与新业态不断发展壮大。主要发达国家在能源转型过程中以科技创新为先导，以体制改革为抓手，致力于解决主体能源向绿色低碳过渡、多能互补耦合利用、终端用能深度电气化、智慧能源网络建设等重大战略问题，构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系，抢占能源科技革命和产业变革的战略制高点。能源技术创新处于高度活跃期，新兴能源技术正以前所未有的速度加快迭代，正孕育一批具有重大产业变革前景的颠覆性技术。文章系统梳理了世界主要发达国家和地区的能源科技领域重大发展战略规划，分析了国际重大科技前沿进展与重要成果，以准确把握世界能源技术变革和演进方向，进而为我国能源科技领域的优先谋划和布局提供重要参考。

关键词 能源科技，战略规划，科技进展，启示建议

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.04.015

能源是人类生存和文明发展的重要物质基础，攸关国计民生和国家战略竞争力。当前经济全球化面临新形势，新一轮科技革命和产业变革方兴未艾，国际分工体系加速演变，全球产业价值链深度重构。全球能源生产消费革命蓬勃兴起，能源科技创新在其中发挥核心引领作用，而从系统层面开展多学科交叉的全价值链创新已成为能源顶层战略规划和科研活动组织的典型模式。准确判断世界能源科技前沿突破方向，强化能源科技战略导向，全面加强能源科技创新高端供给，对我国抢占能源竞争战略制高点、维护国家长远战略利益极为重要。

*通讯作者

资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA21000000），中国科学院战略研究和决策支持系统建设专项（GHJ-ZLZX-2019-35），中国科学院文献情报能力建设专项（Y8KZ321001、Y8KZ361001），中国科学院青年创新促进会项目（2017221）

修改稿收到日期：2019年3月28日

1 发达国家加强能源科技领域顶层设计，谋划主导战略

当今世界面临百年未有之大变局，国际能源格局发生重大变化，围绕能源科技革命和产业变革的国际竞争日趋激烈。近年来基于国际、国内形势变化及自身能源结构特点，世界主要发达国家均把绿色低碳能源技术视为新一轮科技革命和产业变革的突破口，积极实施和调整中长期能源科技战略，并将其作为顶层指导，出台重大科技计划调动社会资源持续投入，不断优化改革能源科技创新体系，以增强国家竞争力和保持领先地位。在能源危机和气候变化成为国际主流议题的大背景下，“低碳能源规模化，传统能源清洁化，能源供应多元化，终端用能高效化，能源系统智慧化”的整体思路已成为主要国家能源战略布局的核心内容。

1.1 美国：谋求世界能源霸主地位

美国自奥巴马政府以来，通过制定《全面能源战略》[1]及配套行动计划，设立先进能源研究计划署和能源创新中心等新型创新平台，支持变革性能源技术开发和有效整合产学研各方资源，推动清洁能源技术革命和产业升级转型[2]，在能源独立和清洁能源转型上已取得了明显进展。

2017年特朗普上台后，推出《美国优先能源计划》[3]，将“美国利益优先”作为核心原则；退出《巴黎协定》避免承担过多的国际责任，强调发展国内的石油、天然气、煤炭等传统能源产业，振兴核电；并将能源作为一种重要的国家战略资源，扩大能源出口，在实现能源独立的过程中谋求世界能源霸主的发展之路。其重要举措包括：实施全面能源战略，多样化能源结构，开发减排技术；推动可再生能源并网，同时保留基荷电源，确保电网可靠性；解决核废料处置问题，确保核能发展的安全性；减少贸易赤字，促进就业，提振美国经济，同时保护环境；将能源作为外交政策重点之一，通过能源战略推动实现国家最重要的利益诉求。2018年，特朗普政府还以中美贸易摩擦之名行高科技打压之实，重点打击包括新能源、先进核能技术在内的高科技产业，遏制中国科技创新快速崛起及战略性新兴产业发展。

1.2 欧盟：推进低碳转型，开展系统创新

自2010年以来，欧盟率先构建了面向2020、2030、2050年的短、中、长期可持续、前瞻性的能源气候战略框架[4-6]，以此推进能源及相关产业的绿色转型，带动欧盟产业调整及经济增长。2014年，新一届欧盟委员会上台后全面实施能源联盟战略，旨在全面提升欧洲能源体系抵御能源、气候及经济安全风险的能力，建立安全、可持续和有竞争力的低碳能源体系。

作为落实欧洲能源联盟战略研究、创新与竞争力目标的举措之一，欧盟委员会于2015年9月开始实施升级版《战略能源技术规划》（SET-Plan）[7]。该规划聚焦能源转型中面临的系统性、跨学科、跨领域的关键挑战，以应用为导向打造能源科技创新全价值链，围绕可再生能源、智能能源系统、能效和可持续交通4个核心领域，以及碳捕集与封存和核能2个特定领域，开展研究与创新优先行动，确立欧盟低碳能源技术研发和部署在全球范围的领先地位。

1.3 日本：压缩核能，发展新能源，掌控产业链上游

日本能源科技创新战略秉承了“技术强国”的整体思路，重点集中在产业链上游的高端技术，依靠对产业链的掌控和影响，使日本的能源技术产品和能源企业在世界市场上占据最大份额，以此促进经济发展。

2016年，日本政府综合科技创新会议公布的《能源环境技术创新战略》[8]，确定了日本到2050年前将要重点推进的五大技术创新领域，包括：利用大数据分析、人工智能、先进传感和物联网技术构建智能能源集成管理系统，创新制造工艺和先进材料开发实现

深度节能，新一代蓄电池和氢能制备、储存与应用，新一代光伏发电和地热发电技术，以及二氧化碳固定与有效利用。

在经历福岛核事故之后，日本在能源科技发展重点上有较大调整，日本政府于2018年7月发布《第五次能源基本计划》[9]，定调未来发展方向是压缩核电发展，降低化石能源依赖度，举政府之力加快发展可再生能源，以氢能作为二次能源结构基础，同时充分融合数字技术，构建多维、多元、柔性能源供需体系，实现2050年能源全面脱碳化目标。

1.4 德国：推动高比例可再生能源转型

德国一贯坚持以可再生能源为主导的能源结构转型，经过多年的政策激励和研发支持，在可再生能源技术和装备制造方面的实力位居世界前列。日本福岛核事故后，德国政府率先提出了全面弃核的能源转型战略[10]，把可再生能源和能效作为两大支柱，并以法律形式明确了可再生能源发展的中长期目标，提出到2050年可再生能源电力占比达到80%[11]。

为从科技层面支持能源转型战略，德国在2018年出台了《第七能源研究计划》[12]，未来5年总预算达64亿欧元。该计划聚焦于能源消费端节能增效、电力供应、系统集成、跨系统研究和核安全等五大领域，重点解决能源转型面临的跨部门和跨系统问题，同时利用“应用创新实验室”机制建立用户驱动创新生态系统，加快成果转移转化。

1.5 发达国家能源科技创新研发趋势

尽管上述各发达国家/地区的发展理念、资源禀赋和制度背景不同，但均将能源科技创新放在能源转型战略的核心位置，通过分析其研发重点可以发现三大共性趋势：① *在能源生产端*，大力开发大型风电、高效低成本太阳能、生物能等可再生能源技术，积极研发碳捕集与利用技术，以期降低化石能源利用的碳排放，并将氢能开发利用作为重要战略储备技术和新兴产业培育；② *在能源消费端*，研发新工艺、新材料，并利用自动化控制以及智能能源管理系统，提高建筑、工业和交通等行业终端用能效率；③ *在能源系统集成层面*，融合储能、智能微网、大数据分析、计算机仿真模拟、物联网等技术，优化各类能源系统，构建高效、经济、安全的新型智慧化能源系统。

2 能源科技创新前沿突破不断涌现

随着能源技术和一系列新兴技术（如纳米、生物、新材料、人工智能等）的发展和深度融合，能源生产、转化、运输、存储、消费全产业链正发生深刻变革。从传统集中式到分布式能源，从智能电网到能源互联网，从石化智能工厂到煤炭大数据平台，从用户侧智慧用能到汽车充电设施互联互通，一些重大或颠覆性技术创新在不断创造新产业和新业态，改变着传统能源格局。

能源生产端诸如可再生能源、先进安全核能、化石能源清洁高效利用等先进技术正在改变传统能源开发利用方式，并稳步推进主体能源的清洁低碳更替。能源消费端致力于研发低能耗、高效能的绿色工艺与装备产品，工业生产向更绿色、更轻便、更高效方向发展，交通动力能源向智能化、电气化方向转变，建筑行业用能将实现洁净化、绿色化、智能化。而分布式智慧供能系统、能源互联网发展应用正在引发能源系统整体变革，智慧能源新业态初现雏形。

2.1 能源转型迈向数字化智能创新时代

人工智能、大数据、物联网等数字技术为能源行业重大挑战提供全新的数字化解决方案，数字化创新集中在数字技术和数据的智能使用上。

国际能源署2017年底发布首份《数字化与能源》[13]报告指出，能源数字化转型的最大潜力是其能够破除能源各部门之间的壁垒，推动全球能源系统向互联、智能、高效、可靠和可持续方向发展。英国石油公司《技术展望报告2018》[14]指出，随着数字技术（包括传感器、超级计算、数据分析、自动化、人工

智能等）依托云网络应用，到 2050 年一次能源需求和成本将降低 20%—30%。大数据和机器学习算法的普及，也推动着科研工作开始采用以人工智能和数据挖掘为基础的新兴研究手段，从而提升研究效率。美国斯坦福大学基于人工智能技术，利用现有的锂离子电池文献中的所有实验数据，构建了具备深度学习能力的计算机预测模型，仅耗时数分钟，即从材料数据库的 1 万多种候选材料中筛选出了 20 余种有潜力的固态电解质材料，其筛选效率是传统随机测试的百万倍[15]。美国能源部还资助了机器学习在地热领域应用的研究项目，聚焦机器学习用于地热资源勘查和开发先进数据分析工具[16]。日本新能源产业技术综合开发机构也部署了相关研究课题，利用物联网、人工智能等技术改善地热发电站的管理运营效率[17]。

2.2 油气领域数字化智能化竞争激烈

化石能源行业正在从传统重资产行业转型为技术密集型、技术精细型产业，各竞争主体对数字化技术的应用速度与水平将会决定未来的行业座次和竞争版图，智能精细化勘采技术的进步将支撑开发深水深层和非常规油气资源。

2017 年世界经济论坛发布的《数字化转型倡议——石油和天然气行业》[18]报告指出，大数据和分析工具、工业物联网和移动技术正成为油气企业首要的数字化主题，而机器人和无人机、可穿戴技术、人工智能将成为未来 3—5 年增长最快的领域。全球多家油气企业相继推出数字化创新举措：壳牌集团宣布在石油行业大规模推进人工智能应用计划，俄罗斯天然气公司实施 2030 年数字化转型战略，巴西国家石油公司成立数字化转型部门，中石油发布国内油气行业首个智能云平台等。

此外，IT 企业也在加强跨界和传统油气企业开展合作：华为公司的油藏模拟、油气物联网等解决方案已服务 70% 的全球 TOP20 油气企业；IBM 公司牵手阿布扎比国家石油公司，首次将区块链技术应用于油气生产核算；通用电气公司和来宝集团联合推出世界第一艘数字钻井船；谷歌公司和道达尔公司将联合攻坚人工智能在油气勘探领域的应用。

2.3 化石能源清洁高效梯级利用

先进高效率低排放燃烧发电和深加工分级转化是煤炭和天然气清洁高效利用的未来发展方向，碳基能源高效催化转化、新型富氧燃烧、先进联合循环等高效低排放技术正处于研发阶段。

美国碳利用研究理事会（CURC）和电力科学研究院（EPRI）在 2018 年 7 月更新的《先进化石能源技术路线图》[19]中，规划了增压富氧燃烧、化学链燃烧、超临界 CO_2 动力循环发电、先进超超临界（A-USC）、煤气化联合循环等高效低碳发电技术到 2035 年的研发与大规模示范路径。美国、日本等发达国家已将超临界 CO_2 动力循环发电系统作为革命性前沿技术进行积极研究，目前在实验室已建成了小功率的试验机组，正在向工业示范电站迈进[20,21]。增材制造（3D 打印）技术在燃气轮机制造中的应用已从原型试制逐渐走向实际生产，如通用电气公司、西门子公司等燃机制造巨头稳步推进制造工艺转型升级[22,23]。

经过多年发展，中国的先进煤化工合成技术取得了重大突破，已掌握了世界领先的百万吨级煤直接液化和煤间接液化技术。中国科学院大连化学物理研究所成功实现了具有自主知识产权的百万吨级煤制烯烃和煤制乙醇技术商业化应用，对保障我国能源安全等具有重要的战略意义。该所还在煤气化直接制烯烃研究上取得重大进展，颠覆了 90 多年来煤化工领域一直沿袭的费-托路线，从原理上开创了一条低耗水进行煤转化的新途径，这是煤转化领域里程碑式的重大突破[24]。

2.4 发展下一代安全高效先进核能系统

可持续性、安全性、经济性和防核扩散能力的先进核能技术是核能发展的重中之重，主要研究方向集

中在开发固有安全特性的第四代反应堆系统、燃料循环利用及废料嬗变堆技术以及更长远的核聚变示范堆设计与实现。

第四代核能系统国际论坛（GIF）在2014年初更新了技术路线图，规划了未来10年第四代堆型的研发目标和里程碑[25]。美国能源部于2017年底宣布，未来5年将资助4亿美元，重点开展新型反应堆示范工程、核电技术监管认证、先进反应堆设计开发等工作，以加速核能技术创新突破[26]。中国科学院在未来先进核裂变能——加速器驱动次临界系统（ADS）研究中取得重大成果，并基于此在国际上首次提出“加速器驱动先进核能系统（ADANES）”概念，将在广东惠州建设国际首台ADS嬗变研究装置[27]。

可控核聚变技术目前在等离子体理论研究、材料开发和运行试验方面不断涌现新的成果。中国科学院合肥等离子体物理研究所研制的全超导托卡马克核聚变实验装置，相继取得等离子体中心电子温度达到1亿摄氏度、百秒量级稳态运行等多项世界级重大突破[28,29]。德国马普学会等离子体物理研究所建造的世界最大仿星器聚变装置W7-X成功产出首个氢等离子体，计划到2020年实现持续30分钟的等离子体[30]。美国国家科学院2018年发布《美国燃烧等离子体研究战略计划最终报告》[31]，建议美国继续参与国际热核聚变实验堆（ITER）计划，并启动国家研究计划迈向紧凑型聚变发电中试阶段。欧盟于2014年在“地平线2020”框架下投入8.5亿欧元，启动了“聚变联合研究计划”[32]。

2.5 新能源与可再生能源加快应用

（1）风能、太阳能、生物燃料等可再生能源技术研发活跃，有望在未来20年成为主导电力来源或规模替代石油基燃料。① 在风能领域，美国[33]和欧盟[34]均提出了海上风电发展战略，加速推动海上风能产业的发展。目前8 MW风力涡轮机已投入商业应用，10 MW及以上的超大规模风力涡轮机正在研发中，浮动式海上风电场的投入使用推动风电向深海迈进。② 在太阳能领域，美国、欧盟、日本等主要国家和地区深化布局光伏发电全产业链创新，作为推进新兴产业发展的主要战略举措，通过全覆盖布局先进材料、制造和系统应用各环节研发实现平价上网目标[35-37]。钙钛矿太阳电池器件结构日趋完善，效率已超多晶硅，逼近单晶硅，但实现商业化仍需攻克规模化制造工艺、稳定性等关键挑战。中国科学院半导体研究所在2018年创造了单结钙钛矿太阳电池转换效率世界纪录（23.7%）[38]。③ 在生物能源领域，纤维素乙醇、藻类生物燃料等技术领域取得了重要进展，特别是美国和欧洲首座商业规模纤维素酶解制乙醇工厂投产[39,40]，为先进低成本生物液体燃料更大规模发展创造了条件。目前研究重点主要集中在高产率能源作物培育改造，微生物酶解催化剂，热化学转化工艺与多功能催化剂，工程微藻选育、培养、油脂提取与转化等。

（2）氢能发展备受重视，形成新一轮的发展热点。日本[41]、欧盟[42]和澳大利亚[43]等国家和地区相继公布了氢能发展战略和技术路线图，提出未来20—30年的氢能与燃料电池技术和产业发展目标。研究人员致力于解决低成本高效率规模化制氢、经济高效氢储存和输配、燃料电池基础关键部件制备和电堆集成、燃料电池发电及车用动力系统集成等重大科技问题。德国亥姆霍兹柏林能源材料中心设计开发了双光阳极串联光电催化系统，创造了太阳能到氢能19%的转化效率纪录[44]。日本国立产业技术综合研究所开发了陶瓷电解质低温致密烧结工艺，制备出全球首个商用规格的质子陶瓷燃料电池[45]。

2.6 新型高能规模化储能取得突破

动力和电力规模储能技术是未来能源系统必不可少的关键组成部分，也是各国竞相布局的重点领域。欧盟组建“欧洲电池联盟”实施战略行动计划，在欧洲打造具有全球竞争力的电池产业链[46]。美国能源部

将在未来5年为储能联合研究中心继续投入1.2亿美元，设计开发新型高能多价化学电池，并研究用于电网规模储能的液流电池新概念[47]。日本新能源产业技术综合开发机构在未来5年资助100亿日元，攻克全固态电池商业化应用的技术瓶颈，旨在2030年左右实现规模化量产[48]。

科学家在储能反应机理探索、电化学体系设计、新材料开发方面成果斐然，研究重点在于开发高安全性、长寿命、低成本的锂离子电池及新型高能化学电源体系，并开展新型物理储能系统规模化示范。美国伊利诺伊大学芝加哥分校等机构合作开发新型锂-空气电池，创造在自然空气环境中稳定运行超700次的循环寿命纪录[49]。美国哈佛大学研发出基于低成本醌类有机电解液的新型液流电池，创造工作寿命最长纪录，而且较全钒液流电池成本大幅下降[50]。中国科学院工程热物理研究所建成了国际首套10 MW级先进压缩空气储能示范系统，示范系统在额定工况下的效率超过60%[51]。

3 中国能源科技发展启示与建议

改革开放40年以来，我国能源科技创新能力已从全部“跟跑”到部分“并跑”，在部分领域已建立了具有国际竞争力的能源装备技术产业，为保障国家能源安全和推动能源清洁低碳转型提供了有力支撑[52]。但我国能源科技创新水平与新时代推动能源生产和消费革命的战略目标仍有较大差距，离构建自主可控的核心技术体系还有较长距离。在我国经济已进入高质量发展阶段的当下，对洁净高效能源的需求比以往任何时候更为迫切，加快推动能源技术革命已经迫在眉睫。

3.1 开展高质量能源科技供给侧改革助力新时代发展

“善谋者因时而动，能弈者顺势而为。”我国必须牢牢把握新一轮能源革命和科技革命交汇的重要战略机遇期，充分认识到能源科技创新在能源革命中的极端重要性，深化开展高质量的能源科技领域供给侧改革，集中攻关关键“卡脖子”问题，包括：开发以煤炭为核心的化石资源清洁高效利用和耦合替代新路线和新技术，突破高能耗、高耗水、高排放等瓶颈问题；突破低碳能源多能互补与规模化应用难题，推进可再生能源高比例消纳，构建智慧能源系统；前瞻布局化石能源/可再生能源/核能多元化融合发展路径，解决我国现有各能源技术体系缺乏关联、孤立发展的结构性缺陷。

中国科学院于2018年正式启动的“变革性洁净能源关键技术与示范”战略性先导科技专项[53]即首次从“清洁低碳、安全高效”国家能源体系顶层设计的角度，提出了通过技术创新实现多种能源之间的互补融合，这是中国科学院站在国家立场上提出的具有原创意义的系统解决设计方案。

3.2 前瞻设计下一代多能融合综合能源系统

多能融合互补是能源变革的发展趋势，引领能源行业构建多种能源深度融合、集成互补的全新能源体系。目前美国、德国等发达国家已开始探索一体化、智能化多能融合体系的架构设计。为破除我国化石能源、可再生能源、核能等各能源体系之间技术上的相对割裂态势，需要尽快开展多能融合的未来能源系统研究，从能源全系统层面着手优化，突破多能互补、耦合利用技术。

科技主攻方向特别应该高度关注信息技术和能源技术深度融合的智慧型能源体系关键技术，以及新一代多能融合系统中低碳醇和氢能等重要能源载体的低成本合成和规模化利用变革性技术，这是新一轮能源革命中我国能源科技有可能走在世界前列的领域，有助于我国抢占先机，早日建成能源科技强国。

3.3 建设能源跨学科交叉融合创新平台

现代文明中能源与气候、环境、交通、化工等领域紧密关联的天然特性，决定了能源转型“牵一发而动全身”。美、欧等发达国家和地区洞察到这一趋

势，均提前部署了跨学科、跨部门的重大课题。能源与前沿学科的交叉融合创新将是未来能源科技创新的最佳路径，也最有可能催生颠覆性技术。

我国应加快研究部署能源跨学科交叉融合创新平台，试点布局重大研究项目，推进能源技术与新一代信息技术、合成生物学技术、纳米技术、先进制造技术等深度融合，带动液态阳光、规模化高性能储能、氢能与燃料电池、智慧综合能源网络等潜在颠覆技术的发展应用，确保我国能够并跑甚至领跑世界能源科技前沿。

3.4 开展体制机制改革加快建立健全能源科技创新体系

我国需要进一步深化能源体制机制改革，合理运用政府宏观调控的引导作用，建立健全能源领域相关的法律法规，打通煤炭、石油、天然气、可再生能源等各能源种类之间的管理体制壁垒，为能源技术创新、产业发展以及现代能源体系建立营造良好稳定的政策制度环境。

特别是，应尽快建立能源领域国家实验室，牵头组织优势力量开展重大关键技术集成化创新和联合攻关。在国家层面建立多元化的能源科技风险投资基金，激励高风险、高回报的颠覆性技术开发，利用政府资源投入来撬动民间资本。实施重大能源工程形成国际竞争优势的高端能源化工技术装备工业体系，在“一带一路”框架下支持更多先进能源化工技术装备“走出去”。

3.5 积极拥抱数字技术推进能源数字化转型

在大数据时代，能源行业的数字化转型已然大势所趋。未来的几十年内，数字技术将使全球能源系统变得更加紧密互联、智能、高效、可靠和可持续。因此需要坚定不移地推进能源和数字技术深度融合，以引导能量有序流动，构筑更高效、更清洁、更经济、更安全的现代能源体系。需要制定灵活政策以适应新技术发展需求，探讨跨部门广泛应用，并对从业人员进行数字技术专业技能培训。

此外，还需要从系统观出发来考量能源数字化转型的成本和收益，密切追踪数字化转型对全球能源消费需求变化的影响，充分考虑和评估能源数字化转型过程中面临的潜在风险，提供公平的竞争环境，以更好地服务各利益相关方，并加强国际合作分享能源数字化转型的成功案例和经验。

参考文献

1 White House. The all-of-the-above energy strategy as a path to sustainable economic growth. [2014-05-29]. http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/docs/aota_energy_strategy_as_a_path_to_sustainable_economic_growth.pdf.

2 陈伟. 美国先进能源研究计划署管理创新研究及对我国的启示. 科学学与科学技术管理, 2016, 37(11): 20-33.

3 White House. An America first energy plan. [2017-03-28]. https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2017/03/28/presidential-executive-order-promoting-energy-independence-and-economi-1.

4 European Commission. Energy 2020: A strategy for competitive, secure, and sustainable energy. [2010-11-10]. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX-:52010DC0639&from=EN.

5 European Commission. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030. [2014-01-22]. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX-:52014DC0015&from=EN.

6 European Commission. Energy Roadmap 2050. [2011-12-15]. http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/com_2011_8852_en.pdf.

7 European Commission. Towards an integrated Strategic Energy Technology (SET) plan: Accelerating the European energy system transformation. [2015-09-15]. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_ACT_part1_v8_0.

pdf.

8 総合科学技術・イノベーション会議.「エネルギー・環境イノベーション戦略（案）」の概要. [2016-04-19]. http://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui018/siryo1-1.pdf.

9 経済産業省. 第5次エネルギー基本計画. [2018-07-03]. http://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001-1.pdf.

10 Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Transforming our energy system—The foundations of a new energy age. [2012-05-01]. https://secure.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_energiewende_en_bf.pdf.

11 Deutscher Bundestag. Gesetz für den vorrang erneuerbarer energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG). [2012-01-01]. https://www.clearingstelle-eeg.de/files/EEG2012_juris_120817.pdf.

12 Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Innovations for the energy transition: 7th energy research programme of the Federal government. [2018-09-19]. https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/7th-energy-research-programme-of-the-federal-government.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

13 International Energy Agency. Digitalization and energy. [2017-11-05]. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/DigitalizationandEnergy3.pdf.

14 BP. Technology outlook 2018. [2018-03-15]. https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/technology/bp-technology-outlook-2018.pdf.

15 Sendek A D, Yang Q, Cubuk E D, et al. Holistic computational structure screening of more than 12 000 candidates for solid lithium-ion conductor materials. Energy & Environmental Science, 2017, 10(1): 306-320.

16 DOE. Energy department announces $3.6 million in machine learning for geothermal energy. [2018-07-19]. https://www.energy.gov/eere/articles/energy-department-announces-36-million-machine-learning-geothermal-energy.

17 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 地熱エネルギーのさらなる高度利用を目指す技術開発8テーマを採択. [2018-07-04]. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100988.html.

18 World Economic Forum. Digital transformation initiative: Oil and gas industry. [2017-01-30]. http://reports.weforum.org/digital-transformation/wp-content/blogs.dir/94/mp/files/pages/files/white-paper-2017-dti-oil-gas.pdf.

19 Carbon Utilization Research Council, Electric Power Research Institute. 2018 CURC-EPRI advanced fossil energy technology roadmap. [2019-03-10]. http://www.curc.net/webfiles/Roadmap/FINAL%202018%20CURC-EPRI%20Roadmap.pdf.

20 DOE. DOE announces $80 million investment to build supercritical carbon dioxide pilot plant test facility. [2016-10-17]. http://www.energy.gov/under-secretary-science-and-energy/articles/doe-announces-80-million-investment-build-supercritical.

21 Toshiba. Toshiba ships turbine for world's first direct-fired supercritical oxy-combustion CO_2 power cycle demonstration plant to US. [2016-11-01]. http://www.toshiba.co.jp/about/press/2016_11/pr0101.htm#PRESS.

22 Siemens. Siemens achieves breakthrough with 3D printed gas turbine blades. [2017-02-06]. https://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2017/power-gas/pr2017020154pgen.htm&content[]=PG.

23 GE. HA technology now available at industry-first 64 percent efficiency. [2017-12-05]. http://www.genewsroom.com/press-releases/ha-technology-now-available-industry-first-64-percent-efficiency-284144.

24 Jiao F, Li J J, Pan X L, et al. Selective conversion of syngas to light olefins. Science, 2016, 351(6277): 1065-1068.

25 OECD Nuclear Energy Agency. Technology roadmap update for generation IV nuclear energy systems. [2014-04-15]. https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-03/gif-tru2014.pdf.
26 DOE. US Industry opportunities for advanced nuclear technology development. [2018-12-07]. https://www.grants.gov/web/grants/search-grants.html?keywords=DE-FOA-0001817.
27 中国科学院高能物理研究所. 中国科学院战略性先导科技专项（A类）“未来先进核裂变能——ADS嬗变系统”专项结题总体验收会召开. [2017-11-14]. http://www.ihep.cas.cn/xwdt/gnxw/2017/201709/t20170929_4866634.html.
28 中国科学院等离子体物理研究所. EAST首次获得百秒量级稳态高约束模等离子体. [2017-07-04]. http://www.ipp.cas.cn/xwdt/kydt/201707/t20170726_378916.html.
29 中国科学院等离子体物理研究所. EAST装置取得1亿度等离子体运行等成果. [2018-11-12]. http://www.cas.cn/syky/201811/t20181112_4670007.shtml.
30 Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. Wendelstein 7-X fusion device produces its first hydrogen plasma. [2016-02-03]. http://www.ipp.mpg.de/4010154/02_16.
31 The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. Final report of the committee on a strategic plan for US burning plasma research. [2018-12-13]. https://www.nap.edu/catalog/25331/final-report-of-the-committee-on-a-strategic-plan-for-us-burning-plasma-research.
32 European Commission. Europe gears up to make fusion energy a reality. [2014-10-15]. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-1111_en.htm?locale=en.
33 DOE, DOI. National offshore wind strategy: Facilitating the development of the offshore wind industry in the United States. [2016-09-08]. http://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/National-Offshore-Wind-Strategy-report-09082016.pdf.
34 European Technology & Innovation Platform on Wind Energy. Strategic research and innovation agenda 2018. [2018-10-24]. https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/ETIPWind-strategic-research-and-innovation-agenda-2018.pdf.
35 DOE. Energy Department Announces Achievement of SunShot Goal, New Focus for Solar Energy Office. [2017-09-12]. https://energy.gov/articles/energy-department-announces-achievement-sunshot-goal-new-focus-solar-energy-office
36 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 太陽光発電コストのさらなる削減を目指す研究開発4テーマを新たに開始. [2017-06-26]. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100785.html.
37 Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Need and opportunities for a strong European photovoltaic industry - The xGWp approach. [2015-01-27]. https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/20150127-efsi-roundtable-pv-industry-support-weber.pdf.
38 NREL. Best research-cell efficiencies. [2019-01-03]. https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png.
39 DOE. Project LIBERTY biorefinery starts cellulosic ethanol production. [2014-09-03]. http://energy.gov/articles/project-liberty-biorefinery-starts-cellulosic-ethanol-production.
40 SUNLIQUID. The sunliquid® process. [2015-12-25]. http://sunliquid-project-fp7.eu/technology/sunliquid-process/.
41 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議. 水素基本戦略. [2017-12-26]. http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-1.pdf.
42 Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. Hydrogen roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition. [2019-02-11]. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf.
43 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. National hydrogen roadmap. [2018-08-23].

https://www.csiro.au/en/News/News-releases/2018/Roadmap-finds-Hydrogen-Industry-set-for-scale-up.

44 Cheng W H, Richter M H, May M M, et al. Monolithic Photoelectrochemical Device for Direct Water Splitting with 19% Efficiency. ACS Energy Letters, 2018, DOI: 10.1021/acsenergylett.8b00920.

45 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 世界初、実用サイズのプロトン導電性セラミック燃料電池セル（PCFC）の作製に成功. [2018-07-04]. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100987.html.

46 European Commission. Strategic action plan on batteries. [2018-05-17]. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0e8b694e-59b5-11e8-ab41-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_3&format=PDF.

47 DOE. Department of energy announces $120 million for battery innovation hub. [2018-09-18]. https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-120-million-battery-innovation-hub.

48 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 全固体リチウムイオン電池の研究開発プロジェクトの第2期が始動. [2018-06-15]. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100968.html.

49 Asadi M, Sayahpour B, Abbasi P, et al. A lithium-oxygen battery with a long cycle life in an air-like atmosphere. Nature, 2018, 555 (7697): 502.

50 Kwabi D G, Lin K X, Ji Y L, et al. Alkaline Quinone Flow Battery with Long Lifetime at pH 12. Joule, 2018, 2: 1-13.

51 中国科学院工程热物理研究所. 北京市科技计划项目“大规模先进压缩空气储能系统研发与示范”顺利通过验收. [2019-01-28]. http://www.etp.ac.cn/xwdt/zhxw/201902/t20190211_5240114.html.

52 章建华. 大力推进新时代能源改革开放. [2019-02-28]. http://www.nea.gov.cn/2019-02/28/c_137857307.htm.

53 中国科学院重大科技任务局. 中科院洁净能源A类先导专项启动会在大连召开. [2018-06-20]. http://www.cas.cn/sygz/201806/t20180620_4655360.shtml.

Analysis of Global Energy Technology Development and Its Strategic Implication

CHEN Wei[1,2*] GUO Kaimo[1] YUE Fang[1]

(1 Wuhan Literature and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2 School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Currently, the global energy system is shifting from the absolute dominance of fossil energy to the transition of low-carbon and multi-energy. The global energy production and consumption revolution is constantly deepening, and emerging industries and new formats continue to grow and develop. In the process of energy transformation, major developed countries take science and technology innovation as the forerunner and take system reform as the starting point. They are committed to solving major strategic problems, such as green energy and low carbon transition, multi-energy complementary coupling utilization, deep electrification, and smart energy network construction. Based on these, they can build a clean, low-carbon, safe and efficient modern energy system, and strive for the competitive strengths of energy science and technology revolution and industrial transformation. At the same time, energy

*Corresponding author

technology innovation is in a highly active period, and emerging energy technologies are accelerating at an unprecedented rate, with a number of disruptive technologies spawning. This study systematically sorts out the major strategic plannings for energy science and technology developed by major developed countries and regions, as well as analyzes the progresses and important achievements of energy technology, which can help to accurately grasp the evolving technology directions. Finally, it proposes several constructive recommendations for the development of energy science and technology in China.

Keywords energy technology, strategy planning, science and technology trends, strategic implication



陈伟　中国科学院武汉文献情报中心战略情报中心副主任，副研究员。中国科学院大学经济与管理学院硕士生导师。中国自然资源学会资源流动与管理研究专业委员会委员，中国科学院青年创新促进会会员。2017—2018年作为访问学者在美国北德克萨斯大学开展合作研究。以第一完成人身份获得国家能源局能源软科学研究优秀成果奖、湖北省科技信息成果奖等。长期从事先进能源科技学科发展战略研究、能源科技政策研究、科技创新规划咨询研究，以及情报分析理论、方法与技术研究。E-mail: chenw@whlib.ac.cn

CHEN Wei Deputy Director and associate research fellow of Information Analysis Department of Wuhan Literature and Information Center, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is also the Master's Supervisor at the School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, the member of Resources Flow and Management Research Committee of China Society of Natural Resources, and the member of Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences. From 2017 to 2018, he, as a visiting scholar, visited University of North Texas in the US. As the principal investigator, he has won the Outstanding Achievement Award of Energy Soft Science Research of the National Energy Administration, and the Hubei Science and Technology Information Achievement Award. His current research interests mainly focus on scientific information analysis, policy analysis, bibliometric analysis, knowledge management, and information service. E-mail: chenw@whlib.ac.cn

■责任编辑：张帆

参考文献（双语版）

1 White House. The all-of-the-above energy strategy as a path to sustainable economic growth. [2014-05-29]. http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/docs/aota_energy_strategy_as_a_path_to_sustainable_economic_growth.pdf.

2 陈伟. 美国先进能源研究计划署管理创新研究及对我国的启示. 科学学与科学技术管理, 2016, 37(11): 20-33.

Chen W. Research on Advanced Research Projects Agency: energy management innovation in the United States and its implications for China. Science of Science and Management of S&T, 2016, 37(11): 20-33. (in Chinese)

3 White House. An America first energy plan. [2017-03-28]. https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2017/03/28/presidential-executive-order-promoting-energy-independence-and-economi-1.

4 European Commission. Energy 2020: A strategy for competitive, secure, and sustainable energy. [2010-11-10]. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52010DC0639&from=EN.

5 European Commission. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030. [2014-01-22]. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0015&from=EN.

6 European Commission. Energy Roadmap 2050. [2011-12-15]. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en.

7 European U C. Towards an integrated strategic energy technology (SET) plan: Accelerating the European energy system transformation EN. Igarss 2014, 2015(1): 1-5.

8 総合科学技術·イノベーション会議. 「エネルギー·環境イノベーション戦略（案）」の概要. [2016-04-19]. http://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui018/siryo1-1.pdf.

Innovation Science Council. Energy and environmental innovation strategy. [2016-04-19]. http://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui018/siryo1-1.pdf. (in Japanese)

9 経済産業省. 第5次エネルギー基本計画. [2018-07-03]. http://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001-1.pdf.

METI. 5th basic energy plan. [2018-07-03]. http://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001-1.pdf. (in Japanese)

10 Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Transforming our energy system—The foundations of a new energy age. [2012-05-01]. https://secure.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_energiewende_en_bf.pdf.

11 Deutscher Bundestag. Gesetz für den vorrang erneuerbarer energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG). [2012-01-01]. https://www.clearingstelle-eeg.de/files/EEG2012_juris_120817.pdf.

German Bundestag. Law on the priority of renewable energy sources energy (Renewable-Energy-Act-EEG). [2012-01-01]. https://www.clearingstelle-eeg.de/files/EEG2012_juris_120817.pdf. (in German)

12 Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Innovations for the energy transition: 7th energy research programme of the Federal government. [2018-09-19]. https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/7th-energy-research-programme-of-the-federal-government.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

13 International Energy Agency. Digitalization and energy. [2017-11-05]. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/DigitalizationandEnergy3.pdf.

14 BP. Technology outlook 2018. [2018-03-15]. https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/technology/bp-technology-outlook-2018.pdf.

15 Sendek A D, Yang Q, Cubuk E D, et al. Holistic computational

structure screening of more than 12 000 candidates for solid lithium-ion conductor materials. Energy & Environmental Science, 2017, 10(1): 306-320.

16 DOE. Energy department announces $3.6 million in machine learning for geothermal energy. [2018-07-19]. https://www.energy.gov/eere/articles/energy-department-announces-36-million-machine-learning-geothermal-energy.

17 新エネルギー·産業技術総合開発機構. 地熱エネルギーのさらなる高度利用を目指す技術開発8テーマを採択. [2018-07-04]. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100988.html.

Energy and industrial technology development organization. Development of technology aiming at further advanced utilization of geothermal energy. [2018-07-04]. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100988.html. (in Japanese)

18 World Economic Forum. Digital transformation initiative: Oil and gas industry. [2017-01-30]. http://reports.weforum.org/digital-transformation/wp-content/blogs.dir/94/mp/files/pages/files/white-paper-2017-dti-oil-gas.pdf.

19 Carbon Utilization Research Council, Electric Power Research Institute. 2018 CURC-EPRI advanced fossil energy technology roadmap. [2019-03-10]. http://www.curc.net/webfiles/Roadmap/FINAL%202018%20CURC-EPRI%20Roadmap.pdf.

20 DOE. DOE announces $80 million investment to build supercritical carbon dioxide pilot plant test facility. [2016-10-17]. http://www.energy.gov/under-secretary-science-and-energy/articles/doe-announces-80-million-investment-build-supercritical.

21 Toshiba. Toshiba ships turbine for world's first direct-fired supercritical oxy-combustion CO_2 power cycle demonstration plant to US. [2016-11-01]. http://www.toshiba.co.jp/about/press/2016_11/pr0101.htm#PRESS.

22 Siemens. Siemens achieves breakthrough with 3D printed gas turbine blades. [2017-02-06]. https://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2017/power-gas/pr2017020154pgen.htm&content[]=PG.

23 GE. HA technology now available at industry-first 64 percent efficiency. [2017-12-05]. http://www.genewsroom.com/press-releases/ha-technology-now-available-industry-first-64-percent-efficiency-284144.

24 Jiao F, Li J J, Pan X L, et al. Selective conversion of syngas to light olefins. Science, 2016, 351(6277): 1065-1068.

25 OECD Nuclear Energy Agency. Technology roadmap update for generation IV nuclear energy systems. [2014-04-15]. https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-03/gif-tru2014.pdf.

26 DOE. US Industry opportunities for advanced nuclear technology development. [2018-12-07]. https://www.grants.gov/web/grants/search-grants.html?keywords=DE-FOA-0001817.

27 中国科学院高能物理研究所. 中国科学院战略性先导科技专项（A类）“未来先进核裂变能——ADS嬗变系统”专项结题总体验收会召开. [2017-11-14]. http://www.ihep.cas.cn/xwdt/gnxw/2017/201709/t20170929_4866634.html.

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences. The general acceptance meeting of the Strategic Priority Research Programs (Category A) of the Chinese Academy of Sciences on “Advanced Nuclear Fission Energy in the Future-ADS Transmutation System” was held. [2017-11-14]. http://www.ihep.cas.cn/xwdt/gnxw/2017/201709/t20170929_4866634.html. (in Chinese)

28 中国科学院等离子体物理研究所. EAST首次获得百秒量级稳态高约束模等离子体. [2017-07-04]. http://www.ipp.cas.cn/xwdt/kydt/201707/t20170726_378916.html.

Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences. EAST obtained steady-state high confinement mode plasma in the order of hundreds of seconds for the first time.

[2017-07-04]. http://www.ipp.cas.cn/xwdt/kydt/201707/t20170726_378916.html. (in Chinese)

29 中国科学院等离子体物理研究所. EAST装置取得1亿度等离子体运行等成果. [2018-11-12]. http://www.cas.cn/syky/201811/t20181112_4670007.shtml.
Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences. EAST device has achieved 100 million degree plasma operation. [2018-11-12]. http://www.cas.cn/syky/201811/t20181112_4670007.shtml. (in Chinese)

30 Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. Wendelstein 7-X fusion device produces its first hydrogen plasma. [2016-02-03]. http://www.ipp.mpg.de/4010154/02_16.

31 The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. Final report of the committee on a strategic plan for US burning plasma research. [2018-12-13]. https://www.nap.edu/catalog/25331/final-report-of-the-committee-on-a-strategic-plan-for-us-burning-plasma-research.

32 European Commission. Europe gears up to make fusion energy a reality. [2014-10-15]. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-1111_en.htm?locale=en.

33 DOE, DOI. National offshore wind strategy: Facilitating the development of the offshore wind industry in the United States. [2016-09-08]. http://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/National-Offshore-Wind-Strategy-report-09082016.pdf.

34 European Technology & Innovation Platform on Wind Energy. Strategic research and innovation agenda 2018. [2018-10-24]. https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/ETIPWind-strategic-research-and-innovation-agenda-2018.pdf.

35 DOE. Energy Department Announces Achievement of SunShot Goal, New Focus for Solar Energy Office. [2017-09-12]. https://energy.gov/articles/energy-department-announces-achievement-sunshot-goal-new-focus-solar-energy-office.

36 新エネルギー·産業技術総合開発機構. 太陽光発電コストのさらなる削減を目指す研究開発4テーマを新たに開始. [2017-06-26]. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100785.html.
Energy and industrial technology development organization. Research and development aiming at further reduction of photovoltaic cost. [2017-06-26]. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100785.html. (in Japanese)

37 Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Need and opportunities for a strong European photovoltaic industry—The xGWp approach. [2015-01-27]. https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/20150127-efsi-roundtable-pv-industry-support-weber.pdf.

38 NREL. Best research-cell efficiencies. [2019-01-03]. https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png.

39 DOE. Project LIBERTY biorefinery starts cellulosic ethanol production. [2014-09-03]. http://energy.gov/articles/project-liberty-biorefinery-starts-cellulosic-ethanol-production.

40 SUNLIQUID. The sunliquid® process. [2015-12-25]. http://sunliquid-project-fp7.eu/technology/sunliquid-process/.

41 再生可能エネルギー·水素等関係閣僚会議. 水素基本戦略. [2017-12-26]. http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-1.pdf.
Council for renewable energy and hydrogen. Basic hydrogen strategy. [2017-12-26]. http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-1.pdf. (in Japanese)

42 Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. Hydrogen roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition. [2019-02-11]. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf.

43 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. National hydrogen roadmap. [2018-08-23]. https://www.csiro.au/en/News/News-releases/2018/Roadmap-finds-Hydrogen-Industry-set-for-scale-up.

44 Cheng W H, Richter M H, May M M, et al. Monolithic photoelectrochemical device for direct water splitting with 19% efficiency. ACS Energy Letters, 2018, 3(8): 1795-1800.

45 新エネルギー·産業技術総合開発機構. 世界初、実用サイズのプロトン導電性セラミック燃料電池セル（PCFC）の作製に成功. [2018-07-04]. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100987.html.

Energy and Industry Technology Development Organization. The first successful, practical fabrication of size proton conductive ceramic fuel cell (PCFC) in the world. [2018-07-04]. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100987.html. (in Japanese)

46 European Commission. Strategic action plan on batteries. [2018-05-17]. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0e8b694e-59b5-11e8-ab41-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_3&format=PDF.

47 DOE. Department of energy announces $120 million for battery innovation hub. [2018-09-18]. https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-120-million-battery-innovation-hub.

48 新エネルギー·産業技術総合開発機構. 全固体リチウムイオン電池の研究開発プロジェクトの第2期が始動. [2018-06-15]. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100968.html.

Energy and Industrial Technology Development Organization. All solid state lithium ion battery research and development project. [2018-06-15]. http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100968.html. (in Japanese)

49 Asadi M, Sayahpour B, Abbasi P, et al. A lithium-oxygen battery with a long cycle life in an air-like atmosphere. Nature, 2018, 555 (7697): 502-506.

50 Kwabi D G, Lin K X, Ji Y L, et al. Alkaline quinone flow battery with long lifetime at pH 12. Joule, 2018, 2(9): 1894-1906.

51 中国科学院工程热物理研究所. 北京市科技计划项目“大规模先进压缩空气储能系统研发与示范”顺利通过验收. [2019-01-28]. http://www.etp.ac.cn/xwdt/zhxw/201902/t20190211_5240114.html.

Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences. Beijing Science and Technology Plan Project “R&D and Demonstration of Large-scale Advanced Compressed Air Energy Storage System” successfully passed the acceptance. [2019-01-28]. http://www.etp.ac.cn/xwdt/zhxw/201902/t20190211_5240114.html. (in Chinese)

52 章建华. 大力推进新时代能源改革开放. [2019-02-28]. http://www.nea.gov.cn/2019-02/28/c_137857307.htm.

Zhang J H. Vigorously promote energy reform and opening up in the new era. [2019-02-28]. http://www.nea.gov.cn/2019-02/28/c_137857307.htm. (in Chinese)

53 中国科学院重大科技任务局. 中科院洁净能源A类先导专项启动会在大连召开. [2018-06-20]. http://www.cas.cn/sygz/201806/t20180620_4655360.shtml.

Bureau of Major R&D Programs, Chinese Academy of Sciences. The start meeting of the Strategic Priority Research Programs (Category A) of the Chinese Academy of Sciences on clean energy was held in Dalian.[2018-06-20]. http://www.cas.cn/sygz/201806/t20180620_4655360.shtml. (in Chinese)